
Diagnóstico de cicatrices

de erosión en masa, cuenca
del río Caramacate, Venezuela

Diagnosis of mass landslides cicatrices
in the basin of the Caramacate River, Venezuela

Carlos Guillén¹

Graciano Elizalde²

¹ Ministerio del Poder Popular para la Agricultura y Tierras (MPPAT),
Instituto Nacional de Salud Agrícola Integral (INSAI), Mérida, Venezuela.

² Universidad Central de Venezuela (UCV), Facultad de Agronomía,
Instituto de Edafología, Laboratorio de Agrología. Maracay, Venezuela
guillencarlos41@gmail.com

Resumen

Los movimientos en masa son considerados uno de los riesgos ambientales más frecuentes en áreas montañosas. Se realizó un estudio en la subcuenca del río Caramacate, cuenca alta del río Guárico, estado Aragua-Venezuela. Se identificaron por fotointerpretación y se digitalizaron en un sistema de información geográfica 651 cicatrices de erosión en masa individuales y 1.684 grupales. Se determinó un índice basado en su densidad para las unidades litogeomorfológicas y los tipos de paisaje, teniendo como resultados que ambos índices dieron valores muy bajos para las cicatrices individuales y medios para las cicatrices grupales. Se determinó que la densidad de las cicatrices aumenta proporcionalmente a la pendiente del terreno, con mayor énfasis entre 20-35°, siendo más alta sobre las cicatrices grupales. Los principales factores condicionantes para los deslizamientos fueron la deleznableidad, la pendiente del terreno y la cobertura vegetal, teniendo como activadores las precipitaciones y los movimientos sísmicos.

PALABRAS CLAVES: erosión en masa; fotointerpretación; tipos de paisaje; ICCEM.

Abstract

Mass movement is considered as one of the most common environmental risks in mountainous areas. A study was carried out in the Caramacate River sub-basin, located in the upper watershed of the Guárico River, Aragua State, Venezuela. 651 of individual scars of mass erosion and 1,684 group scars were identified by photo-interpretation and digitized in a geographic information system. An index based on density for litho-geomorphological units and landscape types was established, concluding that both indexes showed very low values of individual scars and average values of group scars. It was determined that scar density increases proportionally with the slope of land, with higher emphasis between 20-35°, being higher on group scars. The main conditioning factors for landslides were friability; land slope and vegetation cover; having as activators precipitations and seismic movements.

KEY WORDS: mass erosion; photointerpretation; landscapes types; Caramacate sub-basin; ICCEM.

1. Introducción

El agua representa un factor muy importante para la calidad y continuidad de la vida humana. La protección de este recurso se torna indispensable a través de la explotación sostenible de las cuencas hidrográficas. Una de las causas del deterioro de la cantidad y calidad del agua que circula en las cuencas es la erosión, principalmente los movimientos en masa. Este tipo de erosión es un proceso complejo que afecta a todos los componentes del ecosistema bajo la influencia predominante de la gravedad.

Las condiciones climáticas, fundamentalmente relacionadas con precipitaciones esporádicas y excepcionales, constituyen el detonante de riesgos naturales vinculados con procesos de erosión en masa que ocurren con mayor frecuencia, seguidos por los movimientos sísmicos. La erosión se manifiesta en forma severa en aquellas zonas donde las características del suelo y sus materiales parentales, del relieve y de la cobertura vegetal, así lo determinan. Las erosiones en masa son frecuentes y de amplia distribución geográfica; ellas pueden ocurrir como fenómenos recurrentes a corto plazo, de baja intensidad, pero cubriendo extensas áreas, o como eventos de mayor intervalo de retorno, más localizados, pero con mayor intensidad.

Los movimientos en masa son considerados actualmente como uno de los riesgos ambientales que ocurren con mayor frecuencia en las regiones montañosas del planeta. Ellos son el producto de la interacción de varios factores que determinan su desarrollo e intensidad (Guillen, 2006; Elizalde y Daza, 2000; Restrepo *et al.*, 2009; Vasudevan y Ramanathan, 2016).

Elizalde (2011), con base en los conceptos de modelo pedogeomorfológico de Elizalde y Jaimes (1989) y de geoeosistemas de Huggett (1995), plantea que los procesos que dan lugar a la evolución de los paisajes se desarrollan por la interacción de agentes que aportan o modifican la cantidad de materia y de energía necesaria. Estos agentes

corrientemente se denominan factores formadores (Rondón y Elizalde, 1994). Estos factores, al interactuar, no solo determinan los cambios de los atributos y las condiciones de los materiales sólidos y líquidos del ecosistema, sino que concomitantemente, modifican el estado de ellos mismos como factores formadores (Elizalde, 2011).

Algunas aplicaciones para estudiar los procesos erosivos en Venezuela han sido desarrolladas por Fernández (2001), en una propuesta para evaluar la susceptibilidad a la erosión hídrica en microcuencas montañosas, y Elizalde y Daza (2000 y 2003) para evaluar amenazas de movimientos en masa en áreas montañosas del norte del país. El mismo tema fue encarado por López (2004) en la subcuenca de la quebrada Guamita en la cordillera de la Costa Central. En estos trabajos se identifican los factores específicos, los factores relevantes en cada caso, los subfactores, las cualidades¹ relevantes de cada uno de ellos y las características² que permiten evaluarlas cualitativamente. Un enfoque similar desarrolla Conforth (2005) en su modelo multifactorial.

Venezuela cuenta con distintas cuencas hidrográficas que aportan el preciado líquido a distintos usuarios. Uno de los drenajes más importantes del país es la cuenca alta del río Guárico por surtir al embalse de Camatagua, que es la principal fuente de agua para la zona metropolitana de Caracas y regula el flujo hacia el embalse de Calabozo, que suministra agua a uno de los sistemas de riego más importantes del país. Esta cuenca posee 9 subcuencas, entre las cuales se encuentra la del río Caramacate con una superficie de 180 km² aproximadamente (8,5 % de la cuenca alta del río Guárico), y de acuerdo a Ospina y Elizalde (2004a), cerca del 81 % de su superficie presenta una alta capacidad potencial para producir agua.

Elizalde (2004) señala que la cuenca alta del río Guárico, y dentro de ella específicamente la cuenca del río Caramacate, presenta evidencias de un alto grado de deterioro a causa de los procesos

erosivos generalizados. Entre ellos, los que tienen mayor incidencia por los volúmenes de materiales movilizados y el impacto sobre el ambiente son los movimientos en masa (derrumbes, deslizamientos, coladas o flujos rápidos y reptación).

Ospina y Elizalde (2004a) estiman que la subcuenca del río Caramacate presenta aproximadamente un 70 % de susceptibilidad muy alta frente a procesos erosivos, siendo ésta una de las principales causas del deterioro de la calidad de agua y, dado el gran volumen de agua que aporta la subcuenca, de la colmatación con sedimentos del embalse de Camatagua.

Pineda (2008) y Pineda *et al.* (2011) evaluaron cualitativa y cuantitativamente la susceptibilidad a la erosión en masa en un sector de la subcuenca del río Caramacate y discriminaron los factores condicionantes y activadores de tales procesos en ese sector.

El objetivo de este trabajo fue identificar en la cuenca del río Caramacate, las cicatrices de erosión en masa visibles en fotografías aéreas a escala 1:25.000 y vincularlas a las unidades litogeomorfológicas y tipos de paisajes del mapa geomorfológico del área.

2. Metodología

El trabajo es un estudio de aspectos biofísicos de sistemas pedogeomorfológicos intervenidos por la actividad humana, que se enmarca en la concepción orientada a objetos. Estos sistemas están integrados por sólidos (suelos, sedimentos, regolitos y rocas) que interactúan entre sí y con el agua superficial y subsuperficial, y con la atmósfera y biota, dando a lugar, entre otros procesos, a los movimientos en masa (Elizalde y Jaimes, 1989).

2.1 Descripción del área de estudio

La subcuenca del río Caramacate se encuentra ubicada en la zona norte-central del país, dentro

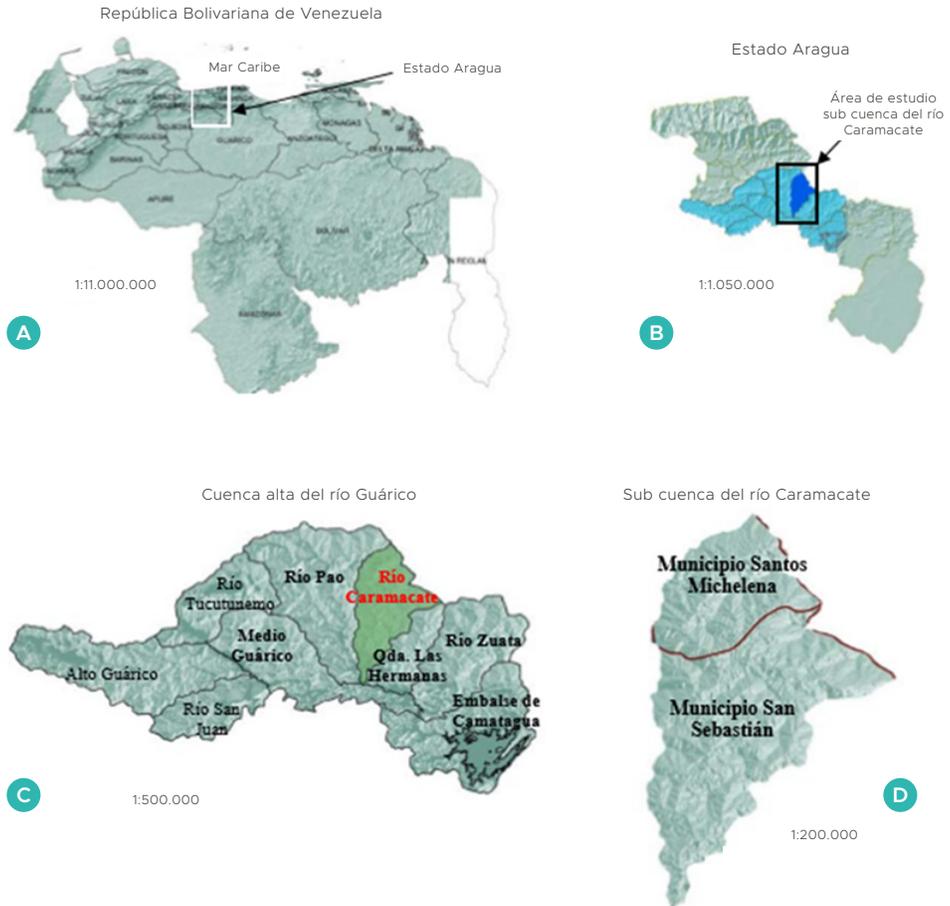
del estado Aragua, Venezuela (FIGURA 1A Y 1B) y, comprende un área de aproximadamente 180 km². Representa un 8,5 % de la cuenca alta del río Guárico, siendo una de las nueve subcuencas que la conforman. Limita con la subcuenca del río Pao al oeste y la subcuenca de la quebrada Las Hermanas al este (FIGURA 1C). Posee un perímetro de 72,979 km. y una longitud axial de 25,425 km. Está conformada por 25 microcuencas, incluyendo la microcuenca de salida al poblado de San Sebastián de los Reyes. Desde el punto de vista administrativo, la subcuenca abarca parte de dos municipios: San Sebastián y Santos Michelena (FIGURA 1D). Las poblaciones más importantes en la subcuenca son San Sebastián de los Reyes al sur y Tiara al norte.

Las unidades naturales de la subcuenca están constituidas por un sistema de montañas de la serranía del Interior en la parte más alta, y altiplanicies del piedemonte de la misma serranía en las zonas más bajas. Los afluentes más importantes del río Caramacate son los ríos Tiara y El Altar. Las principales vías de acceso están hacia el sur de la cuenca donde conectan con la carretera nacional San Juan de los Morros-San Sebastián de los Reyes y, por el norte, se accede por la carretera nacional Tejerías-Tiara.

La cuenca del río Caramacate posee un relieve accidentado prácticamente en toda su superficie; las zonas más altas alcanzan hasta 1.422 msnm y están hacia el noreste de la subcuenca en el sector El Altar y en el suroeste está el valle, cuya zona más baja se encuentra a 326 msnm, donde se asienta la población de San Sebastián de los Reyes (Ochoa *et al.*, 2004).

Jácome (2002) identificó un centro de precipitación importante a lo largo de la parte media de la subcuenca del río Caramacate (cerca de la estación Tiara), el cual supera los 1.400 mm anuales y aumenta en sentido sureste hasta valores de 1.600 mm anuales.

FIGURA 1 Ubicación relativa de la zona de estudio: **A.** escala nacional; **B.** escala regional (estado Aragua); **C.** cuenca alta del río Guárico y, **D.** escala municipal. Modificado de Jácome *et al.*, 2001



Ochoa (2003) discriminó los 7 tipos de cobertura vegetal de la subcuenca del río Caramacate que se muestran en el **CUADRO 1**.

El patrón de drenaje de la subcuenca de Caramacate es dendrítico, con sentido general norte-sur, con punto de salida de la cuenca sobre el río Guárico, al sur de la población de San Sebastián de los Reyes. La orientación de las quebradas y ríos dentro de la cuenca está influenciada por las fallas menores ortogonales de rumbos SO-NE y SE-NO.

El curso de agua principal es el río Caramacate, con régimen permanente (Jácome, 2002).

Según el mapa geomorfológico elaborado por Ospina y Elizalde (2004b), considerando las categorías sistemáticas de los paisajes que define Elizalde (2011), la subcuenca de Caramacate se encuentra ubicada dentro de la Megaregión Orográfica (O), en la Región Fisiográfica Cordillera de La Costa Central (OC)³, forma parte de la Provincia Fisiográfica Serranía del Interior Central (OCI) y de dos subprovincias fisiográficas:

CUADRO 1 Tipos de cobertura vegetal de la subcuenca del río Caramacate.

FUENTE: OCHOA (2003)

Cobertura vegetal	Superficie	
	Hectáreas	%
Herbazal normal	8.266	54
Herbazal con palma corozo	564	4
Herbazal degradado	564	4
Bosque de galería	3.709	24
Bosque siempre verde	1.816	12
Bosque semidecídúo	392	3
Matorral deciduo.	79	1

- Sistema Montañoso Centro Oriental (OCIB), el cual abarca el 98 % de la superficie de la subcuenca. Esta unidad está constituida por un sistema de montañas escarpadas, de rumbos variables, aunque sus ejes principales están ligeramente orientados en sentido suroeste-noreste.
- Valles Aluviales de San Sebastián (OCID), se encuentran ubicados en el extremo sur de la cuenca, abarcando un 2 % de superficie de ésta. Corresponde a un conjunto de pequeñas colinas, terrazas y fondos de valle, de origen principalmente aluvial que se han formado como resultado de la deposición de sedimentos transportados principalmente por el río Caramacate.

Como quinto nivel jerárquico, la subcuenca contiene 11 unidades litogeomorfológicas que forman parte de las subprovincias fisiográficas indicadas. Estas unidades constituyen paisajes que abarcan extensiones mayores a 1 km². Los criterios empleados en la delimitación de estas unidades son la litoestratigrafía, al nivel de formaciones geológicas, lo que permite distinguir 10 unidades litogeomorfológicas pertenecientes a la subprovincia OCIB: Lomas de Hierro (OCIBS),

Tiara (OCIBV), Paracotos (OCIBP), El Caño (OCIBÑ), El Chino (OCIBH), Santa Isabel (OCIBI), El Carmen (OCIBC), Asociación de Paracotos (OCIBL), Guárico (OCIBG), Cuaternario (OCIBQ) y la unidad litogeomorfológica del Cuaternario perteneciente a la subprovincia OCID: OCIDQ.

Como sexto nivel jerárquico, en la cuenca están descritos 25 tipos de paisajes, los cuales son subdivisiones de las unidades litogeomorfológicas con extensiones mayores a 0.0625 km² (6.25 ha), que pueden ser cartografiados a escala 1:25.000. Los criterios empleados en la delimitación de estas unidades son la configuración del terreno, la pendiente y las condiciones bioclimáticas.

2.2 Escala de trabajo

Para la identificación de las cicatrices producidas por los movimientos en masa en la subcuenca del río Caramacate, se analizaron imágenes de sensores remotos (pares estereoscópicos de fotografías aéreas y ortofotomapas), a escalas de trabajo semidetallado (1:25.000), ya que se estima que a esta escala pueden ser detectadas áreas de desplazamientos de materiales (cicatrices) mayores a 1 mm², que corresponden a superficies de por lo menos 625 m² (25 m x 25 m).

2.3 Fotointerpretación y digitalización

La erosión en masa es un fenómeno geomorfológico causado por un conjunto de factores que interactúan entre sí, unos con mayor intensidad que otros, dando como resultado los desplazamientos de los materiales erodables en función de la pendiente. Esta transformación del paisaje deja como evidencia una configuración que refleja a los movimientos en masa que se hayan producido. Esta configuración la denominamos 'cicatrices de movimientos en masa'. Estas cicatrices pueden corresponder a un proceso individual suficientemente grande como para ser identificado a la escala de trabajo o a un grupo de cicatrices adyacentes que no pueden ser discriminadas independientemente de la escala de trabajo utilizada para la fotointerpretación, pero que el conjunto es visible en las fotografías aéreas. Dichos desplazamientos pueden haber ocurrido más o menos al mismo tiempo o en períodos diferentes, pero están geográficamente asociados.

A partir de pares estereoscópicos de fotografías aéreas a escala aproximada de 1:25.000 de la subcuenca del río Caramacate pertenecientes a la misión 030198 de fecha 05 de abril de 1975, se realizó la foto-lectura y fotointerpretación analógica para identificar la distribución de las cicatrices de erosión en masa en la subcuenca.

Seguido a esta identificación se procedió a ubicar y digitalizar con el software ArcGIS los puntos de cicatrices de erosión en los ortofotomapas digitales del año 1995 a escala 1:25.000, identificados como: El Pao de Zárate 6746-II-NO, El Amparo 6746-II-NE, Valle La Tarasca 6746-II-SO y San Casimiro 6746-II-SE; y sobre el mapa digital de tipos de paisajes elaborado por Ospina y Elizalde (2004b) y el Modelo Digital de Elevación (MDE) realizado por Ochoa (2003), obteniéndose como resultado su distribución geográfica y su relación con la geomorfología y topografía en un mapa a escala 1:25.000.

2.4 Índice de concentración de cicatrices de erosión en masa (ICCEM)

Para comparar la densidad de cicatrices de las diferentes unidades litogeomorfológicas entre sí y de las distintas unidades de tipos de paisajes entre sí, se procedió a unir los polígonos del mapa geomorfológico de Ospina y Elizalde (2004b), con los puntos de cicatrices de erosión en masa, de manera de vincular cada cicatriz a las unidades litogeomorfológicas y tipos de paisajes. Ello permitió calcular los índices de concentración de cicatrices de erosión en masa para ambas categorías de la clasificación de paisajes, según las fórmulas del CUADRO 2.

También se elaboró un índice para evaluar la densidad de cicatrices de erosión en masa para los rangos de pendiente agrupados cada 5°, basados en el modelo digital de elevación de Ochoa (2003), y su fórmula también se muestra en el CUADRO 2.

Los valores del ICCEM obtenidos se agruparon en 5 clases: muy Alta (>0,20), alta (0,15 - 0,20), media (0,10 - 0,15), baja (0,05 - 0,10) y muy baja (<0,05).

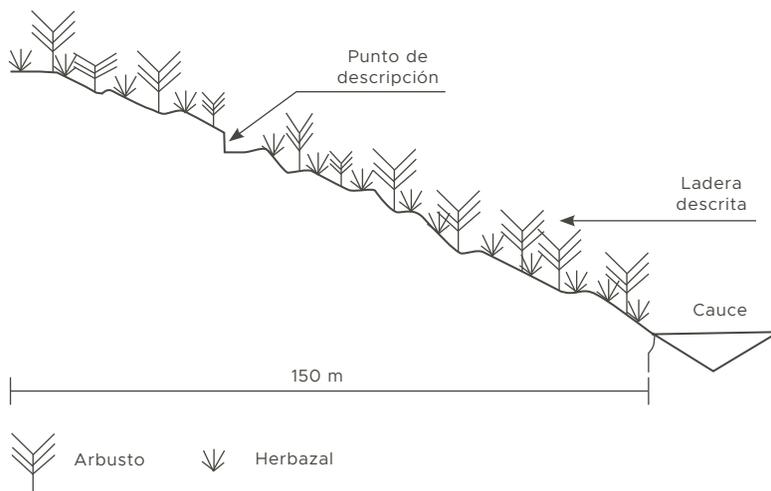
2.5 Comprobación de campo

En la fase de campo se comprobaron las características indicadoras relevantes para la evaluación de las amenazas de erosión en masa. Para ello se describieron 12 puntos de muestreo en dos transectos, a lo largo de toda la subcuenca del río Caramacate. En cada punto se evaluó el entorno de la cicatriz individual o grupo de cicatrices asociadas, se describió el perfil de suelo a través de barrenos o en cortes ubicados en las adyacencias inmediatas a la cicatriz (FIGURA 2) y se describieron las rocas que se encontraban en el punto de muestreo; también se estimaron las pendientes longitudinales y transversales de la microcuenca que conduce el drenaje superficial que afecta al sitio de la cicatriz, la posición geomorfológica del punto, el tamaño de la microcuenca que domina

CUADRO 2 Fórmulas utilizadas para calcular los diferentes índices de concentración de cicatrices de erosión en masa (ICCEM)

ÍNDICE	FÓRMULA
ICCEM LI	Número de cicatrices de erosión en masa individuales en cada unidad litogeomorfológica / Superficie de la unidad litogeomorfológica (ha)
ICCEM LG	Número de cicatrices de erosión en masa grupales en cada unidad litogeomorfológica / Superficie de la unidad litogeomorfológica (ha)
ICCEM LT	Número de cicatrices de erosión en masa individuales y grupales en cada unidad litogeomorfológica / Superficie de la unidad litogeomorfológica (ha)
ICCEM PI	Número de cicatrices de erosión en masa individuales en cada unidad de paisaje / Superficie de la unidad de paisaje (ha)
ICCEM PG	Número de cicatrices de erosión en masa grupales en cada unidad de paisaje / Superficie de la unidad de paisaje (ha)
ICCEM PT	Número de cicatrices de erosión en masa individuales y grupales en cada unidad de paisaje / Superficie de la unidad de paisaje (ha)
ICCEM IRP	Número de cicatrices de erosión en masa individuales por rango de pendiente / Superficie de cada rango de pendiente (ha)
ICCEM GRP	Número de cicatrices de erosión en masa grupales por rango de pendiente/ Superficie de cada rango de pendiente (ha)
ICCEM TRP	Número de cicatrices de erosión en masa individuales y grupales por rango de pendiente/ Superficie de cada rango de pendiente (ha)

FIGURA 2 Esquema de la descripción de campo de los puntos de muestreo y sus adyacencias. Corte transversal



la cicatriz, la formación vegetal dominante y el tipo de uso de la tierra. En total, en cada uno de los puntos se reconocieron 26 características.

2.6 Determinación del análisis de Componentes Principales a través del Índice de Homogeneidad Múltiple

Una vez recabada la información en campo se procedió a seleccionar, a partir de la matriz de variables, aquellas que ofrecieran la mayor varianza de cada grupo o matriz de variables. Esto se realizó a través del cálculo de los componentes principales por medio del índice de homogeneidad múltiple de Daza y Elizalde (1988).

La matriz de variables consta de 26 características por 12 puntos de muestreo, pero una de las normas que requiere el análisis de componentes principales es que el número de variables sea inferior al número de puntos de muestreo, por lo tanto, se procedió a dividir dicha matriz en tres grupos, obteniéndose para los tres grupos valores propios, porcentaje de contribución de cada valor propio y los vectores propios.

De acuerdo a Plá (1986), Jaimes (1988) y Elizalde (1997), cada componente principal resume la máxima variabilidad residual contenida en los datos originales de cada grupo. Consecuentemente se adoptó el criterio de seleccionar aquellos valores propios que fueran mayores o iguales a 1, con el fin de facilitar los cálculos matemáticos, además de tener un nivel de referencia común para los tres grupos.

Para calcular la contribución de cada atributo sobre la variabilidad del grupo, se aplicó la ecuación señalada por Jaimes (1988), la cual se expresa de la siguiente manera:

$$C_i = \sum_{j=1}^n \sum_{j=1}^m [(X_{i,j})^2 \cdot (\lambda_j / n) \cdot 100] \quad (6)$$

Donde C_i es la contribución de la i -ésima variable a la varianza del sistema; $X_{i,j}$ es el vector propio

de la i -ésima variable en el j -ésimo valor propio; n es el total de variables estudiadas en el sistema (grupo); λ_j / n es el valor promedio correspondiente al j -ésimo valor propio; y m representa el número de componentes vectores propios con valor propio mayor o iguales a uno $\lambda_j \geq 1,0000$. Procedimiento que permitió identificar las variables que en cada grupo aportan más a la ocurrencia de la erosión en masa.

3. Resultados

Se identificaron 1.684 grupos de cicatrices y 651 cicatrices individuales, distribuidas sobre diferentes unidades geomorfológicas de las dos categorías de la clasificación de paisajes de la cuenca seleccionadas para este estudio. Esa información permitió calcular el índice ICCEM que expresa la concentración de cicatrices por unidad geomorfológica (CUADRO 3).

Este índice se representó en el mapa geomorfológico de tipos de paisaje a escala 1:25.000, de manera de evidenciar la concentración de cicatrices, ya sean individuales o grupales de cada una de las unidades litogeomorfológicas o de tipos de paisaje a lo largo de toda la subcuenca (FIGURAS 3). En la FIGURA 3 (derecha) también se representaron las dos transectas utilizadas para las comprobaciones de campo.

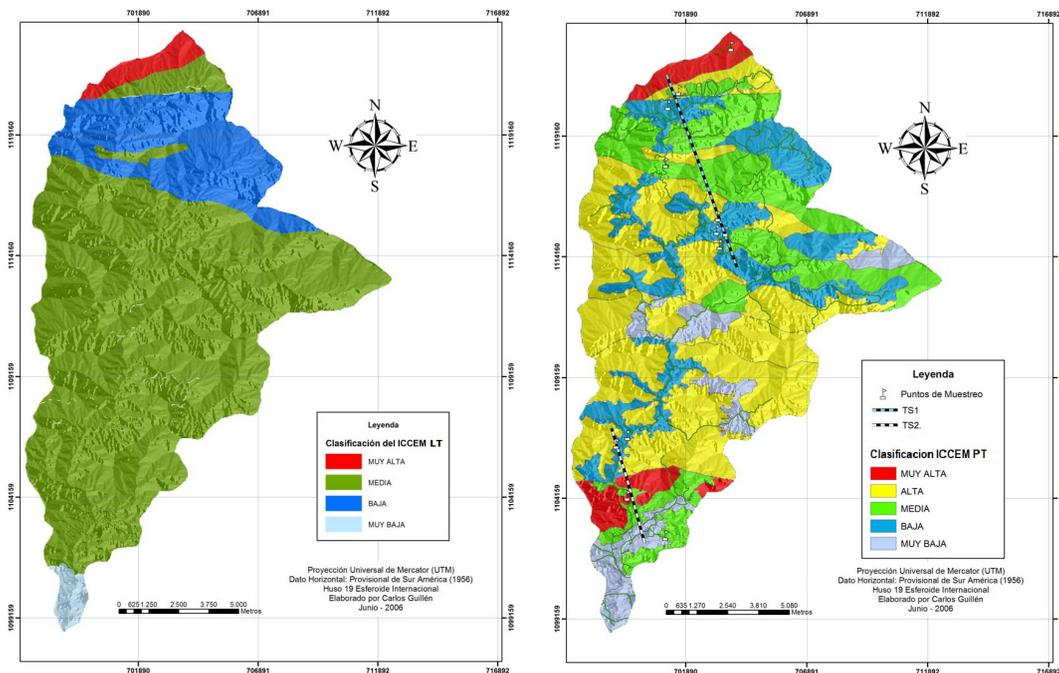
Debido a que la metodología utilizada solo permite la identificación de cicatrices que abarcan más de 625 m², una parte de cicatrices individuales fue registrada cuando ellas estaban agrupadas, por ello el número de cicatrices individuales en el CUADRO 3 es casi 3 veces más pequeño que el número de cicatrices grupales.

La concentración de la totalidad de las cicatrices de movimientos en masa (tanto grupales como individuales) en cada una de las unidades litogeomorfológicas, se evaluó mediante el ICCEM LT, el cual representa la importancia de los movimientos

CUADRO 3 Superficie en ha y % que abarcan las clases de ICCEM para las cicatrices individuales y grupales, determinadas para las unidades litogeomorfológicas y tipos de paisajes

	N° cicatrices	Superficie de las clases de iccem (ha) / (%)									
		Unidades litogeomorfológicas				Tipos de paisajes					
		Muy baja	Baja	Media	Alta	Muy alta	Muy baja	Baja	Media	Alta	Muy alta
Individuales	651	17.579 / 98	439 / 2	0 / 0	0 / 0	0 / 0	15.584 / 86	2.434 / 14	0 / 0	0 / 0	0 / 0
Grupales	1.684	279 / 2	7.921 / 44	9.379 / 52	439 / 2	0 / 0	4.971 / 28	4.231 / 23	7.820 / 43	996 / 6	0 / 0
Totales	2.335	279 / 2	3.169 / 18	13.977 / 78	154 / 1	439 / 2	1.537 / 9	3.576 / 20	4.089 / 23	7.820 / 43	996 / 6

FIGURA 3 Clases del ICCEM LT para el total de cicatrices por unidad litogeomorfológica (izquierda) y del ICCEM PT para el total de cicatrices por unidad de tipo de paisaje (derecha)



en masa en cada unidad litogeomorfológica de la clasificación de paisajes de la subcuenca elaborada por Ospina y Elizalde (2004b). El ICCEM LT evidencia el predominio de una concentración media de cicatrices (0,10-0,15 cicatrices de movimientos en masa por ha), la cual abarca el 78 % de la super-

ficie de la cuenca (13.977 ha), seguida por la clase baja, que tiene una extensión de 3.179 ha (18 % de la superficie de la cuenca) (FIGURA 3 y CUADRO 3).

En la FIGURA 3 se observa que los paisajes desarrollados sobre las Serpentinitas y demás rocas del Complejo Ofiolítico de Lomas de Hierro, que

se encuentra al norte de la cuenca, presentan muy altas concentraciones de cicatrices. Las áreas desarrolladas sobre las formaciones pertenecientes al Grupo Villa de Cura (El Chino, El Carmen, El Caño y Santa Isabel) y Volcánicas de Tiara tienen concentraciones de cicatrices medias. El sector de la cuenca desarrollado sobre rocas de la formación de Paracotos (ubicada entre el Complejo Ofiolítico y el Grupo Villa de Cura) tiene concentraciones bajas, y las unidades que corresponden a los sedimentos cuaternarios y formación Guárico (en el extremo sur), tienen concentración de cicatrices muy bajas.

La mayor concentración de cicatrices individuales y grupales que presenta la unidad litogeomorfológica desarrollada sobre las Serpentinitas y demás rocas del complejo Ofiolítico de Lomas de Hierro, indican una mayor susceptibilidad de estos materiales respecto a este tipo de erosión. Ello es un indicio de la influencia que tiene la composición de los materiales geológicos sobre la ocurrencia de movimientos en masa. Esta influencia es el efecto de la cualidad denominada deleznablez, la cual es definida por Fernández (2001) y Ospina y Elizalde (2004a) como el grado de susceptibilidad de las rocas, regolitos y sedimentos a ser disgregados y transportados con facilidad.

El ICCEM PT refleja la importancia de la pendiente del terreno sobre este proceso de erosión, ya que de las 13 unidades de tipos de paisajes definidas por Ospina y Elizalde (2004b) que presentan pendientes medias superiores a 35 %, ocho tienen un ICCEM PT alto o muy alto, dos ICCEM PT medio, una bajo y dos muy bajo. En general, el 50 % de la superficie de las unidades de paisaje tiene una concentración de cicatrices alta o muy alta. Esto permitió relacionar la ubicación de las cicatrices con los rangos de pendientes entre 0 y 50° tomados cada 5 grados, de manera de determinar los límites críticos en los cuales se encuentra la mayor cantidad de cicatrices de movimientos

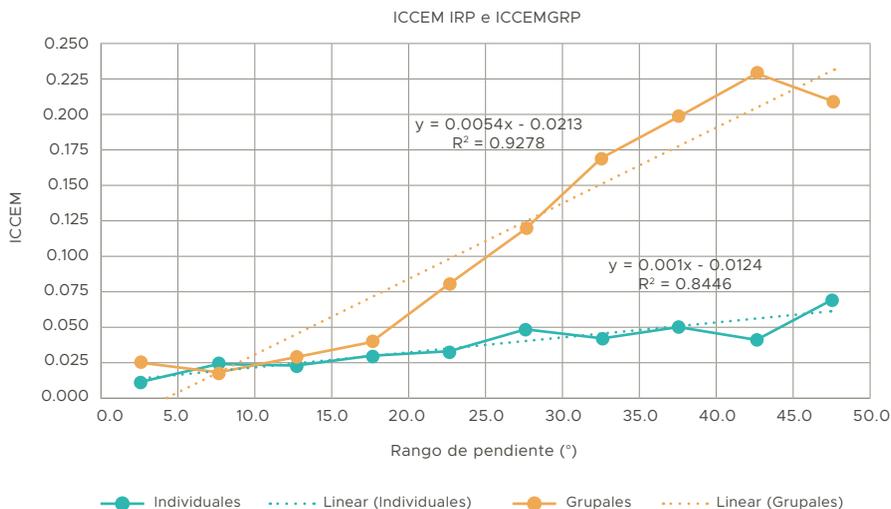
tanto individual como grupal; obteniéndose como resultado que 378 de las 651 cicatrices individuales (58 %), y 1.095 de las 1.684 cicatrices grupales (65 %), se encuentran en el rango de pendiente entre 20° a 35° (36 % a 70 %).

Para cuantificar las densidades de las cicatrices de movimientos en masa y su distribución respecto a los rangos de pendiente, se calculó el Índice de Concentración de Erosión en Masa individual, grupal y total para cada rango (ICCEM IRP, ICCEM GRP, ICCEM TRP). En la FIGURA 4 se observan los resultados para ambos tipos de cicatrices. Como era de esperar, la densidad de cicatrices aumenta directamente proporcional a la pendiente del terreno, resultando una relación lineal significativa en los dos casos, pero el efecto de la pendiente sobre las cicatrices grupales es unas 5 veces mayor que sobre las cicatrices individuales. Ese efecto se manifiesta a partir de 20° de pendiente (36 %); por debajo de ese valor las densidades de ambos tipos de cicatrices son similares y muy bajas, pero a partir de allí la frecuencia de cicatrices grupales por unidad de superficie se incrementa constantemente hasta alcanzar el máximo con una pendiente de 40° a 45° (70 - 100 %). A su vez, el mayor incremento del ICCEM de las cicatrices individuales se produce con una pendiente de 25° a 30°, y de 30° a 35° para las cicatrices grupales.

De esta forma se evidencia que el patrón de distribución de las densidades de cicatrices de erosión en masa está influenciado por el grado de inclinación que presenta el sitio: cuanto mayor es la pendiente mayor es la densidad de cicatrices de movimientos en masa.

El análisis de componentes principales arrojó que las variables que tienen mayor influencia sobre los procesos de erosión en masa para la subcuenca del río Caramacate son la densidad de fracturas y fallas (10,59 %), y la consistencia de la roca; (10,12 %). Ambas, como señalan Sidle *et al.* (1985), permiten el aumento de la infiltración, promoviendo de esta

FIGURA 4 Índice de Concentración de Cicatrices de Erosión en Masa individuales (ICCEM IRP) y grupales (ICCEM GRP) por rango de pendiente en grados sexagesimales para la subcuenca del río Caramacate



manera la formación de planos de deslizamientos o zonas de debilidad en los materiales rocosos. Las dos variables se relacionan con la cualidad de las rocas definida como deleznableidad (Fernández, 2001) y, en conjunto, explican el 20,71 % de la variabilidad relacionada con los atributos de los sitios de muestreo observados en el campo.

La tercera variable del análisis de componentes principales es la formación vegetal de cobertura dominante (10,11 %). Sidle *et al.* (1985) expresan que los movimientos en masa pueden llegar a incrementarse hasta 4 a 5 veces tanto en su número como en su tamaño cuando el paisaje ha sido deforestado. Restrepo *et al.* (2009) especifican que la cobertura vegetal afecta las propiedades tanto del suelo como de sus materiales parentales y rocas, ya sea incrementando su resistencia o aumentando su susceptibilidad a la erosión, de 5 maneras:

- a) Las raíces incrementan la resistencia de los agregados del suelo
- b) Las raíces que penetran en las juntas y fracturas de las rocas contribuyen a la meteorización

física y química, incrementando la deleznableidad de los materiales

- c) Por el peso de la vegetación
- d) Por la intercepción de la lluvia, lo cual:
 - Favorece la infiltración del agua en el sustrato (suelos, regolitos, sedimentos y rocas), lo cual disminuye la escorrentía, pero aumenta el peso de esos materiales y favorece su meteorización.
 - Aumenta el peso de la propia cobertura vegetal.
- e) Porque influye sobre la evapotranspiración, lo cual adquiere mayor relevancia cuando los materiales son expansibles.

De acuerdo a Jácome (2002), en la subcuenca del río Caramacate ha habido un cambio constante de bosque semidecídúo a sabanas o pastos naturales. Ello concuerda con el CUADRO 1 elaborado con base a los datos de Ochoa (2003), donde se observa que los herbazales constituyen el 62 % de la cobertura de la subcuenca, mientras que los distintos tipos de bosques representan el 38 %. De acuerdo con esos antecedentes, la subcuenca del río Caramacate

es más susceptible a los movimientos en masa en el presente que en épocas anteriores, previas al incremento de la deforestación.

Los resultados expuestos indican que en las imágenes de 1995 hay una cicatriz de movimientos en masa de por lo menos 625 m² de superficie cada 7,7 ha. Ello representa que más del 0,8 % de la superficie de la subcuenca había sido afectada por este tipo de erosión en eventos suficientemente cercanos a esa fecha como para que sus trazos fueran aún visibles en el paisaje.

Los valores del ICCEM determinados revelan que la densidad de cicatrices varía según las unidades litogeomorfológicas y los tipos de paisajes, es decir que ponen en evidencia la influencia de los tipos de materiales geológicos, la configuración del terreno, las condiciones bioclimáticas y la pendiente. Ejemplo de ello son los resultados obtenidos tanto con el ICCEM IRP, como el ICCEM GRP, los cuales se mantienen en valores muy bajos cuando las pendientes son menores a 20° o sea 36 %, que es un límite crítico a partir del cual se desencadenan los movimientos en masa en la zona. A esos factores se suman los efectos de la cobertura vegetal.

En síntesis, cada unidad litogeomorfológica o de tipo de paisaje de la subcuenca del río Caramacate tiene un punto crítico a partir del cual se produce el desprendimiento y transporte masivo de la vegetación, suelo, sedimentos, regolitos y rocas, bajo el efecto de la gravedad; que depende de la relación entre las cualidades y características de los materiales propios de la unidad respecto a la fuerza que se ejerza sobre el terreno. Ello puede ser expresado por la siguiente ecuación (adaptada de Restrepo *et al.* 2009):

Punto crítico = Resistencia/Fuerza

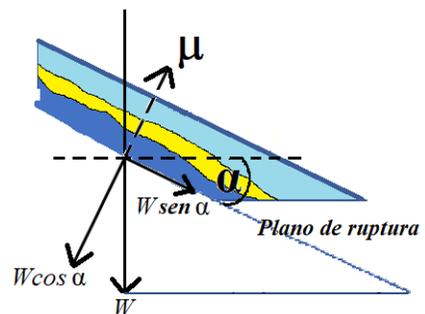
$$PC = R/F = \frac{C'/\cos \alpha + (W\cos \alpha - \mu) \tan \phi'}{W\sin \alpha + A}$$

Dónde **PC** es el punto crítico; **R** es la resistencia de los materiales a desprenderse; **F** es la Fuerza que se ejerce sobre el plano potencial de ruptura o **Wsen α** ; **C'** es la cohesión de los materiales, ya sea suelos incluyendo raíces, sedimentos, regolitos y rocas; α es el ángulo de pendiente del plano potencial de ruptura, que puede ser el contacto entre horizontes de suelos, estratos sedimentarios o planos de fractura de rocas; **W** es el peso de los materiales por encima del punto de falla, incluye los sólidos (suelo, regolito, sedimento, rocas, cobertura vegetal, construcciones) y el agua contenida o adherida a esos materiales; σ_n es la presión efectiva ejercida sobre el plano de ruptura o **Wcos α** ; **m** es la presión de agua de poro; **f** es el ángulo de fricción interna de los materiales donde se ubica el plano potencial de ruptura; y **A** es el componente horizontal de la aceleración sísmica.

El peso de los materiales (**W**) en el punto de ruptura se divide en 2 componentes: **Wcos α** o presión efectiva (**s_n**) sobre el plano de ruptura, que aumenta la resistencia, y **Wsen α** que es la fuerza dependiente de la gravedad que produce la ruptura o desprendimiento, a la cual se suma la fuerza proveniente de movimientos sísmicos (**FIGURA 5**).

FIGURA 5 Esquema de las fuerzas que controlan la ocurrencia de erosión en masa en un punto determinado de una ladera.

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA BASADA EN RESTREPO *ET AL.* (2009)



4. Conclusiones

Los resultados evidencian que la erosión por movimientos en masa es un proceso controlado por la acción conjunta de un grupo de variables (factores) y que ninguno de ellos, de forma individual, puede ser considerado como el factor determinante. En la subcuenca del río Caramacate, los principales factores condicionantes son la deleznablez de los materiales determinada por su consistencia y densidad de fracturas, la pendiente y la cobertura vegetal. Los factores activadores son las precipitaciones y los movimientos sísmicos. El agua aportada por las precipitaciones disminuye la consistencia y el ángulo de fricción interna de los materiales, aumenta la presión de agua de poro y el peso de los materiales. En esta subcuenca la interacción de los factores condicionantes y activadores se lleva a cabo en pendientes mayores al punto crítico de 20° , pendiente a partir del cual las fuerzas que producen el desprendimiento de los materiales superan la resistencia de éstos a desprenderse.

El ICCEM resultó una herramienta fundamental para determinar la distribución espacial de las cicatrices de erosión en masa y relacionarlas con

las unidades litogeomorfológicas y con unidades de paisaje del mapa geomorfológico del área, así como con los rangos de pendiente.

Los sistemas de información geográficos (SIG) sirvieron para espacializar la información recabada, de manera de tener un manejo más eficiente de la misma y tomar las decisiones pertinentes para el desarrollo del presente trabajo.

El procedimiento metodológico utilizado en este estudio se muestra adecuado para sustentar posibles decisiones en cuanto a políticas y gestión de la cuenca, de manera de prevenir el deterioro gradual de la producción de agua.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen la colaboración prestada por el Departamento e Instituto de Edafología de la Facultad de Agronomía de la Universidad Central de Venezuela (UCV) y al FONACIT por el apoyo al presente trabajo, el cual fue desarrollado dentro del proyecto 'Manejo Integral de la Cuenca Alta del Río Guárico'.

6. Notas

- ¹ Las cualidades de la tierra son el resultado de las interacciones entre las condiciones de uso y manejo y las características del sitio (por ejemplo, riesgo de erosión en laderas deforestadas, con determinado grado de pendiente y formadas por una determinada clase de materiales). No pueden ser medidas directamente, sino estimadas a partir de las características que se vinculan con ellas, bajo ciertas condiciones de uso.
- ² Las características de la tierra son atributos que pueden ser medidos en el campo o laboratorio (por ejemplo, granulometría del suelo, gradiente de pendiente, temperatura).
- ³ La definición y descripción de la Megaregión Orogénica y la Región Fisiográfica Cordillera de la Costa Central puede ser consultada en Elizalde *et al.* (2007).

6. Referencias citadas

- CONFORTH, DH. 2005. *Landslides in practice: Investigations, analysis and remedial/preventive options in soils*. John Wiley & Sons, Inc. USA.
- DAZA, M. y G. ELIZALDE. 1988. *Programa IH para la determinación del IH (Índice de Homogeneidad) mediante microcomputadora*. Instituto de Edafología. Facultad de Agronomía. Universidad Central de Venezuela. Maracay, Venezuela.
- ELIZALDE, G. 1997. "El Índice de homogeneidad múltiple y su utilidad para la cartografía detallada del sistema pedogeomorfológico". *Revista de la Facultad de Agronomía*, 23(2): 187-206.
- ELIZALDE, G. 2004. *Selección de áreas piloto representativas. Manejo integral de la cuenca alta del río Guárico*. Núcleo de Investigación y excelencia Proyecto Iniciativa Científica del Milenio. Sub. Proyecto I: Diagnostico general y estratificación de la cuenca alta del río Guárico, Tomo 2. Informe 13. Facultad de Agronomía. Universidad Central de Venezuela. Maracay, Venezuela.
- ELIZALDE, G. 2011. "Clasificación sistemática de categorías de paisajes. Propuesta de un marco conceptual". *Revista Venesuelos*, 19(1): 23-43.
- ELIZALDE, G. y M. DAZA. 2000. "Evaluación de amenazas de movimientos en masas en paisajes de montaña: ejemplos en el estado Vargas (Venezuela)". *Revista Venesuelos*, 8(1 y 2): 29-41.
- ELIZALDE, G. y M. DAZA. 2003. "Procedimiento para evaluar amenazas de movimientos en masa con información restringida en paisajes montañosos". *Revista Facultad de Agronomía*, 29(1): 197-208.
- ELIZALDE, G y E. JAIMES. 1989. "Propuesta de un modelo pedogeomorfológico". *Revista Geográfica Venezolana*, (XXX): 5-35.
- ELIZALDE, G.; VILORIA J. y A. ROSALES. 2007. "Geografía de suelos de Venezuela". En: *GeoVenezuela, Medio Físico y Recursos Ambientales*. pp. 402-537. Fundación Empresas Polar. Caracas, Venezuela.
- FERNÁNDEZ, L. 2001. *Propuesta metodológica para determinar grados de susceptibilidad a la erosión hídrica en microcuencas tropicales*. Departamento de Edafología. Facultad de Agronomía. Universidad Central de Venezuela. Maracay, Venezuela. Tesis de Doctorado.
- GUILLÉN, C. 2006. *Diagnóstico de cicatrices de erosión en masa en la subcuenca del río Caramacate de la cuenca alta del río Guárico (CARG) y su relación con elementos geomorfológicos*. Departamento de Edafología. Facultad de Agronomía. Universidad Central de Venezuela. Maracay, Venezuela. Trabajo Especial de Grado. (Inédito).
- HUGGETT, R. J. 1995. *Geoecology: An evolutionary approach*. Rutledge. London, UK.
- JÁCOME, A. 2002. *Evaluación del efecto del cambio de cobertura y uso de la tierra sobre la producción de sedimentos en la cuenca del río Caramacate (Subcuenca Portante del Embalse Camatagua)*. Departamento de Edafología. Facultad de Agronomía. Universidad Central de Venezuela. Maracay, Venezuela. Trabajo de Ascenso.
- JÁCOME, A.; AGUERREVERE G. y M. T. LÓPEZ. 2001. *Sistema de Información Ambiental. Cuenca alta del río Guárico. Informe final*. FUNDACITE Aragua. Maracay, Venezuela.
- JAIMES, E. 1988. *Determinación de Índices de Homogeneidad Múltiples Globales en sistemas pedogeomorfológicos de la cordillera de la Costa de la serranía del Litoral Central*. Universidad Central de Venezuela. Maracay, Venezuela. Tesis de Doctorado.

- LÓPEZ, C. 2004. *Estudio de riesgo de erosión por movimientos en masa en la subcuenca de la quebrada Guamita, vertiente sur del Parque Nacional "Henri Pittier"*. Departamento de Edafología. Facultad de Agronomía. Universidad Central de Venezuela. Maracay, Venezuela. Trabajo Especial de Grado.
- OCHOA, J. 2003. *Análisis de la cobertura y uso de la tierra a escala semidetallada, a partir del procesamiento visual de una imagen de satélite LANDSAT, en la cuenca del río Caramacate*. Departamento de Edafología. Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela. Trabajo Especial de Grado.
- OCHOA, J.; JÁCOME, A. y J. VILORIA. 2004. *Caracterización del relieve de las subcuencas de los ríos Caramacate y San Julián, por medio de modelos digitales de elevación*. Manejo integral de la cuenca alta del río Guárico. Núcleo de Investigación y Excelencia. Proyecto Iniciativa Científica del Milenio. Sub. Proyecto II: Diagnóstico físico natural de la cuenca alta del río Guárico, Tomo 1. Informe 1. Facultad de Agronomía. Universidad Central de Venezuela. Maracay, Venezuela.
- OSPINA, A. y G. ELIZALDE. 2004a. *Modelo pedogeomorfológico de la subcuenca del río Caramacate*. Manejo integral de la cuenca alta del río Guárico. Núcleo de Investigación y Excelencia Proyecto Iniciativa Científica del Milenio. Sub. Proyecto II: Diagnóstico físico natural de la cuenca alta del río Guárico, Tomo 2. Informe 13. Facultad de Agronomía. Universidad Central de Venezuela. Maracay, Venezuela.
- OSPINA, A. y G. ELIZALDE. 2004b. *Clasificación de paisajes de la subcuenca del río Caramacate*. Manejo integral de la cuenca alta del río Guárico. Núcleo de Investigación y Excelencia Proyecto Iniciativa Científica del Milenio. Sub. Proyecto II: Tomo 1, Informe 3. Facultad de Agronomía. Universidad Central de Venezuela. Maracay, Venezuela.
- PINEDA M. C. 2008. *Determinación de áreas susceptibles a movimientos en masa y erosión laminar en unidades de paisaje de la subcuenca de río Caramacate, localizada en la cuenca alta del río Guárico*. Departamento de Edafología. Facultad de Agronomía. Universidad Central de Venezuela. Maracay, Venezuela. Trabajo de Ascenso.
- PINEDA, M. C.; ELIZALDE, G. y J. VILORIA. 2011. "Determinación de áreas susceptibles a deslizamientos en un sector de la cordillera de la Costa Central de Venezuela". *Interciencia*, 36(5): 370-377.
- PLÁ, L. 1986. *Análisis Multivariado: Método de Componentes Principales*. Instituto Interamericano de estadística. Sec. General de la OEA. Washington D. C. USA.
- RESTREPO, C; WALKER, L. R.; SHIELS, R.; BUSSMANN, R.; CLAESSENS, L.; FISCH, S.; LOZANO, P.; NEGI, G.; PAOLINI, L.; POVEDA, G.; RAMOS-SCHARRON, C.; RICHTER, M. & E. VELÁZQUEZ. 2009. "Landsliding and Its multiscale influence on mountainscapes". *BioScience*, 59(8): 685-698.
- RONDÓN, C. y G. ELIZALDE. 1994. "Procesos pedogenéticos en un modelo de sistema suelo, formado por nueve subsistemas". *Revista Venesuelos*, 2(1): 32-37.
- SIDLE, R.; PEARCE, A. & C. O'LOUGHLIN. 1985. *Hillslope stability and land use*. American Geophysical Union. Washington, D. C. USA.
- VASUDEVAN, N. & K. RAMANATHAN. 2016. Geological factors contributing to landslides: case studies of a few landslides in different regions of India. *IOP Conference Series: Earth Environmental Science*. 30, 01201.